

УДК 530.182:621.385.6
DOI: 10.20310/1810-0198-2016-21-2-619-623

ВЛИЯНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ ВОЗМУЩЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ЛЕГИРУЮЩЕЙ ПРИМЕСИ НА ВОЛЬТ-АМПЕРНУЮ ХАРАКТЕРИСТИКУ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ СВЕРХРЕШЕТКИ

© А.О. Сельский, Д.В. Лопатин

В настоящей работе исследуется влияние пространственной локализации возмущения концентрации легирующей примеси на коллективную динамику транспорта заряда в полупроводниковой сверхрешетке. Показано, что характеристики тока, протекающего через сверхрешетку, сильно зависят от точки локализации возмущения. Вследствие изменения порогового значения напряжения, при котором возникает генерация колебаний тока, частота и амплитуда колебаний при фиксированном значении напряжения, приложенного к сверхрешетке, также сильно зависят от пространственной локализации возмущения.

Ключевые слова: примесь; ВАХ; полупроводниковая сверхрешетка.

Объектом исследования в настоящей работе является гетероструктура, состоящая из чередующихся слоев (ширина слоя, как правило, не превышает нескольких десятков нанометров) различных полупроводниковых материалов с близкими периодами кристаллической решетки – полупроводниковая сверхрешетка [1–2]. Сверхрешетки служат удобной моделью для изучения различных квантово-механических эффектов [3–4]. Не меньший интерес вызывает коллективная динамика электронов при приложении к сверхрешетке постоянного напряжения, поскольку в этом случае в структуре могут образовываться пространственно-временные электронные структуры, называемые доменами (по аналогии с доменами в диоде Ганна [5–6]). Прохождение доменов через полупроводниковую сверхрешетку приводит к возникновению колебаний тока, протекающего через структуру, частота которых составляет, как правило, несколько десятков гигагерц. Следует отметить, что в настоящее время все больше внимания исследователей уделяется рассмотрению транспорта электронов через полупроводниковую сверхрешетку с позиций нелинейной динамики, что позволяет выявлять и объяснять различные эффекты, наблюдающиеся в исследуемой системе [7–18].

Важным фактом является то, что при создании полупроводниковых гетероструктур возможно возникновение большого числа различных пространственных неоднородностей (к примеру, случайные флуктуации концентрации легирующей примеси [19–20]), которые оказывают влияние на характеристики сверхрешетки. Помимо случайных флуктуаций возможно целенаправленное изменение концентрации легирующей примеси для улучшения характеристик прибора. В настоящей работе исследован вопрос, как пространственное положение неоднородности в виде возмущения концентрации легирующей примеси влияет на коллективную динамику электронов в полупроводниковой сверхрешетке.

Типовой моделью при описании процессов транспорта заряда в полупроводниковой сверхрешетке является система уравнений, включающая в себя уравнение

непрерывности, уравнение Пуассона и выражение для плотности тока с учетом дрейфовой скорости электрона [2; 9]:

$$e \frac{\partial n}{\partial t} = \frac{\partial J}{\partial x}$$

$$\frac{\partial F}{\partial x} = \frac{e}{\epsilon_0 \epsilon_r} (n - n_{D0}) \quad (1)$$

$$J = env_d(\bar{F}),$$

где t обозначает время, а координата x соответствует направлению движения электронов в полупроводниковой сверхрешетке. Величины $n(x,t)$, $F(x,t)$, и $J(x,t)$ определяют концентрацию, напряженность электрического поля и плотность тока, соответственно. Параметры $\epsilon_0, \epsilon_r = 12,5$ соответствуют абсолютной и относительной диэлектрическим проницаемостям; $n_{D0} = 3 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$ – равновесная концентрация электронов; v_d – дрейфовая скорость электрона, вычисленная для среднего значения напряженности электрического поля \bar{F} , и $e > 0$ – заряд электрона. Зависимость дрейфовой скорости, входящей в уравнение (1), от напряженности электрического поля определяется по формуле Эсаки–Тсу [4].

В качестве рассматриваемого возмущения используется локальное увеличение концентрации легирующей примеси. Для введения возмущения модифицируем Пуассона из (1) следующим образом:

$$\frac{\partial F}{\partial x} = \frac{e}{\epsilon_0 \epsilon_r} (n - (n_{D0} + n_{D1}(x))) \quad (2)$$

где $n_{D1}(x)$ – кусочно-линейная функция следующего вида:

$$n_{D1}(x) = \begin{cases} 0, & x < x' - \Delta x \\ 0,5, & x' - \Delta x < x < x' + \Delta x \\ 0, & x > x' + \Delta x \end{cases} \quad (3)$$

здесь x' – положение центра возмущения; $\Delta x = 12,45$ нм – определяет размер рассматриваемого возмущения. Вид профиля концентрации легирующей примеси $n_D(x) = n_{D0} + n_{D1}(x)$ при различных значениях x' продемонстрирован на рис. 1. На рис. 1 для удобства значения концентрации нормированы на значение n_{D0} , а значения координаты центра возмущения нормированы на длину структуры $L = 116,2$ нм.

Рассмотрим результаты моделирования влияния неоднородности легирования. Важной характеристикой коллективной динамики электронов является вольт-амперная характеристика. Для построения вольт-амперной характеристики на участке, где есть колебания тока, значение тока на вольт-амперной характеристике усреднялось по времени (метод построения вольт-амперных характеристик и их вид для невозмущенного состояния концентрации легирующей примеси ($n_{D1}(x) = 0$ вдоль всей сверхрешетки) описан в [11]), см. рис. 1с, 1д.

В качестве характеристики изменения вольт-амперной характеристики при смещении центра возмущения концентрации легирующей примеси введем величину Θ , рассчитываемую следующим образом:

$$\Theta = \frac{\int |I(V) - I_0(V)| dV}{\int I_0(V) dV}, \quad (4)$$

где $I(V)$ – значение тока при данном напряжении для возмущенного состояния; $I_0(V)$ – значение тока при данном напряжении для невозмущенного состояния. Зависимость данной величины от координаты центра возмущения приведена на рис. 2а. Можно видеть, что значение Θ существенно заметно отличается от нуля, когда возмущение находится в начале гетероструктуры (соответствует разнице между кривыми 1 и 2 на рис. 1с), и быстро уменьшается при приближении возмущения к концу сверхрешетки (см. кривые 1 и 2 на рис. 1д). Это говорит о том, что динамика рассматриваемой системы зависит не только от наличия и размера возмущения концентрации легирующей примеси, но и от его локализации в пространстве.

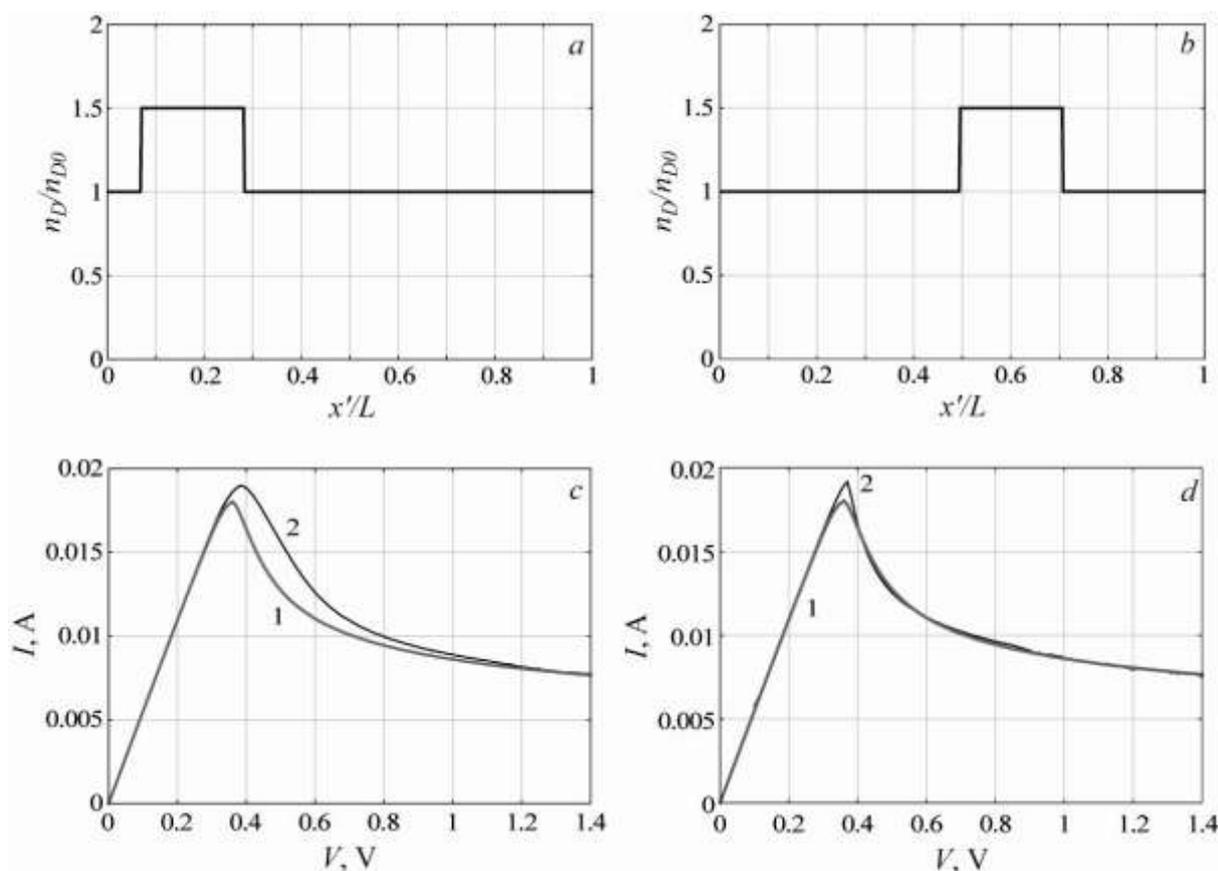


Рис. 1. Профили концентрации легирующей примеси при различных значениях координаты центра возмущения: $a - x' = 20,75$ нм; $b - x' = 70,55$ нм. Кривые 1 (c, d) – вольт-амперные характеристики для случая без возмущения. Кривые 2 – вольт-амперные характеристики в случае локального возмущения концентрации легирующей примеси при различных значениях координаты центра возмущения: $c - x' = 20,75$ нм; $d - x' = 70,55$ нм

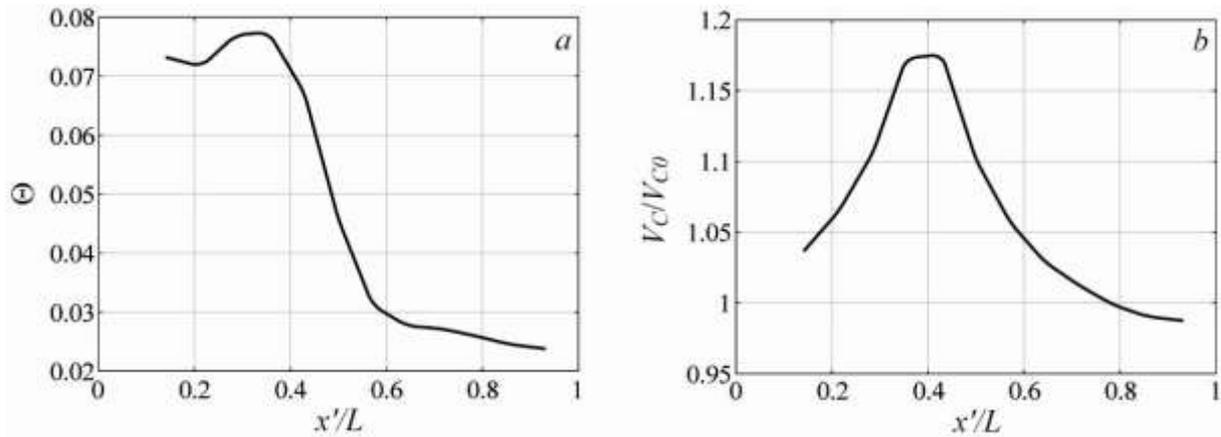


Рис. 2. *a* – зависимость интеграла модуля разности токов для возмущенного и невозмущенного состояний по напряжению, Θ , от различных значений координаты центра возмущения; *b* – зависимость порогового значения напряжения, V_C , при котором начинается генерация колебаний тока, от значения координаты центра возмущения

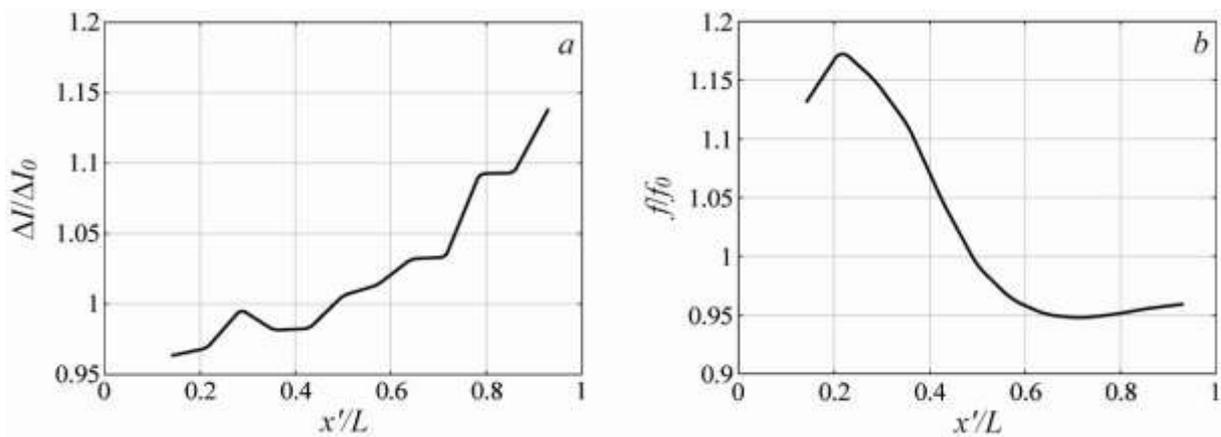


Рис. 3. Зависимости амплитуды (*a*) и частоты (*b*) колебаний тока, протекающего через полупроводниковую сверхрешетку, при напряжении $V = 0,6$ В от различных значений координаты центра возмущения

Еще одной важной характеристикой коллективной динамики электронов является пороговое значение напряжения, V_C , при котором возникает генерация колебаний тока. Зависимость данной величины от координаты центра возмущения показана на рис. 2*b*. На рисунке хорошо заметно, что есть максимум порогового напряжения для значения $x'/L = 0,4$ ($x' = 46,5$ нм). При других пространственных локализациях возмущения пороговое значение напряжения, при котором начинается генерация колебаний тока, меньше.

Из работы [9] известно, что после начала генерации, с ростом напряжения, амплитуда колебаний монотонно возрастает, а частота – монотонно убывает. Таким образом, изменение порогового напряжения должно приводить к тому, что при одних и тех же значениях напряжения, в зависимости от локализации возмущения, частота и амплитуда колебаний будут различаться. В области увеличенного порогового значения напряжения, приложенного к полупроводниковой сверхрешетке (т. е. в случае, когда возмущение находится в первой части сверхрешетки), частота колебаний должна быть выше, а амплитуда – ниже, для одних и тех же значений приложенного напряжения (см. рис.к 3, построенный при напряжении $V = 0,6$ В). Более того, если

пространственное возмущение локализовано во второй половине сверхрешетки, частота колебаний может быть ниже, чем частота для случая без возмущения при том же значении приложенного напряжения.

Таким образом, в настоящей работе было показано, что характеристики колебаний тока, протекающего через сверхрешетку, существенно зависят от пространственной локализации возмущения концентрации легирующей примеси. Если возмущение находится ближе к началу системы, в первой половине сверхрешетки, то вольт-амперная характеристика существенно изменяется, увеличивается пороговое значение напряжения, при котором начинается генерация колебаний, и, как следствие, увеличивается частота колебаний при фиксированном напряжении, по сравнению с невозмущенной динамикой электронов в сверхрешетке. Если же сместить возмущение ближе к концу исследуемой системы, то пороговое значение напряжения и вольт-амперная характеристика оказываются близки к случаю без возмущения, однако, амплитуда при фиксированном напряжении будет выше, а частота – ниже, по сравнению с невозмущенной динамикой электронов в сверхрешетке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шик А.Я. Полупроводниковые структуры с дельта-слоями // ФТП. 1974. Т. 8. С. 1841-1864.
2. Wacker A. Semiconductor superlattices: a model system for nonlinear transport // *Phys. Rep.* 2002. V. 357. P. 1-111.
3. Келдыш Л.В. О влиянии ультразвука на электронный спектр кристалла // *Физика твердого тела*. 1962. Т. 4. С. 2265-2267.
4. Esaki L., Tsu R. Superlattice and negative differential conductivity // *IBM J. Res. Develop.* 1970. V. 14. P. 61-65.
5. Scheuerer R., Schomburg E., Renk K.F., Wacker A., Schöll E. Feasibility of a semiconductor superlattice oscillator based on quenched domains for the generation of sub-millimeter waves // *Appl. Phys. Lett.* 2002. V. 81. P. 1515-1517.
6. Eisele H., Khanna S.P., Linfield E.H. Superlattice electronic devices as high-performance oscillators between 60–220 GHz // *Appl. Phys. Lett.* 2010. V. 96. P. 072-101.
7. Bonilla L.L., Grahn H.T. Nonlinear dynamics of semiconductor superlattices // *Rep. Prog. Phys.* 2005. V. 68. P. 577-683.
8. Fromhold T.M., Patané A., Bujkiewicz S. et al. Chaotic electron diffusion through stochastic webs enhances current flow in superlattices // *Nature*. 2004. V. 428. P. 726-730.
9. Selskii A.O., Koronovskii A.A., Hramov A.E. et al. Effect of temperature on resonant electron transport through stochastic conduction channels in superlattices // *Phys. Rev.* 2011. V. 84. P. 235-311.
10. Bonilla L.L., Teitworth S.W. Nonlinear Wave Methods for Charge Transport // WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2010. V. 9. P. 255-272.
11. Hramov A.E., Makarov V.V., Koronovskii A.A. et al. Subterahertz Chaos Generation by Coupling a Superlattice to a Linear Resonator // *Physical review letters*. 2014. V. 112. P. 116603.
12. Selskii A.O., Hramov A.E., Koronovskii A.A., Moskalenko O.I., Balanov A.G. Bifurcation phenomena in a semiconductor superlattice subject to a tilted magnetic field // *Phys. Lett. A*. 2016. V. 380. № 1–2. P. 98-105.
13. Макаров В.В., Максименко В.А., Короновский А.А., Скворцова Ю.М., Храмов А.Е. Высокочастотный импеданс полупроводниковой сверхрешетки во внешней резонансной системе // *Письма в ЖТФ*. 2015. Т. 41. № 24. С. 44-50.
14. Баланов А.Г., Журавлев М.О., Короновский А.А., Сельский А.О., Ханенко М.В., Храмов А.Е., Шурыгина С.А. К вопросу о моделировании распределения электронов по импульсам в полупроводниковой сверхрешетке // *Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки*. Тамбов, 2010. Т. 15. Вып. 2. С. 519-523.
15. Макаров В.В., Храмов А.Е., Короновский А.А., Москаленко О.И., Максименко В.А., Алексеев К.Н., Баланов А.Г. Переход к хаосу и хаотическая генерация в полупроводниковой сверхрешетке во внешней резонансной системе // *Изв. РАН. Сер. Физическая*. 2014. Т. 78. № 12. С. 1564-1567.
16. Maksimenko V.A., Makarov V.V., Koronovskii A.A., Alekseev K.N., Balanov A.G., Hramov A.E. The effect of collector doping on the high-frequency generation in strongly coupled semiconductor superlattice // *Europ. Phys. J. B*. 2015. V. 109. P. 47007.
17. Makarov V.V., Maksimenko V.A., Khranova M.V., Pavlov A.N., Hramov A.E. Dynamics and Fluctuations in Biomedical Photonics XIII // *Proc. SPIE*. 2016. V. 9707. P. 9707-9713.
18. Алексеев К.Н., Баланов А.Г., Короновский А.А., Максименко В.А., Москаленко О.И., Храмов А.Е. Эволюция возмущения опорного состояния полупроводниковой сверхрешетки вблизи порога генерации // *Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика*. 2012. Т. 20. № 2. С. 165-178.
19. Wacker A., Schwarz G., Prengel F. et al. Probing growth-related disorder by high-field transport in semiconductor superlattices // *Phys. Rev. B*. 1995. V. 52. P. 13788.
20. Patra M., Schwarz G., Schöll E. Bifurcation analysis of stationary and oscillating field domains in semiconductor superlattices with doping fluctuations // *Phys. Rev.* 1998. V. 57. P. 18-24.

БЛАГОДАРНОСТИ: Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-32-60059).

Поступила в редакцию 1 апреля 2016 г.

UDC 530.182:621.385.6

DOI: 10.20310/1810-0198-2016-21-2-619-623

INFLUENCE OF THE CHANGE OF THE SPATIAL POSITION OF THE PERTURBATION OF THE DOPING CONCENTRATION ON THE CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTIC IN THE SEMICONDUCTOR SUPERLATTICE

© A.O. Selskiy, D.V. Lopatin

In the present paper the influence of the change of the spatial position of the perturbation of the doping concentration on the electron collective dynamics in the semiconductor superlattice is considered. It is shown that the amplitude and frequency of the current oscillations in superlattice distinct dependence sufficiently on the spatial position of the perturbation.

Key words: doping concentration; current-voltage characteristic; semiconductor superlattice.

REFERENCES

1. Shik A.Ya. Poluprovodnikovye struktury s del'ta-sloyami. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, 1974, vol. 8, pp. 1841-1864.
2. Wacker A. Semiconductor superlattices: a model system for nonlinear transport. *Phys. Rep.*, 2002, vol. 357, pp. 1-111.
3. Keldysh L.V. O vliyaniy ul'trazvuka na elektronnyy spektr kristalla. *Fizika tverdogo tela*, 1962, vol. 4, pp. 2265-2267.
4. Esaki L., Tsu R. Superlattice and negative differential conductivity. *IBM J. Res. Develop.*, 1970, vol. 14, pp. 61-65.
5. Scheuerer R., Schomburg E., Renk K.F., Wacker A., Schöll E. Feasibility of a semiconductor superlattice oscillator based on quenched domains for the generation of sub-millimeter waves. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, vol. 81, pp. 1515-1517.
6. Eisele H., Khanna S.P., Linfield E.H. Superlattice electronic devices as high-performance oscillators between 60–220 GHz. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, vol. 96, pp. 072-101.
7. Bonilla L.L., Grahn H.T. Nonlinear dynamics of semiconductor superlattices. *Rep. Prog. Phys.*, 2005, vol. 68, pp. 577-683.

8. Fromhold T.M., Patané A., Bujkiewicz S. et al. Chaotic electron diffusion through stochastic webs enhances current flow in superlattices. *Nature*, 2004, vol. 428, pp. 726-730.
9. Selskii A.O., Koronovskii A.A., Hramov A.E. et al. Effect of temperature on resonant electron transport through stochastic conduction channels in superlattices. *Phys. Rev.*, 2011, vol. 84, pp. 235-311.
10. Bonilla L.L., Teitsworth S.W. *Nonlinear Wave Methods for Charge Transport*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2010, vol. 9, pp. 255-272.
11. Hramov A.E., Makarov V.V., Koronovskii A.A. et al. Subterahertz Chaos Generation by Coupling a Superlattice to a Linear Resonator. *Physical review letters*, 2014, vol. 112, p. 116603.
12. Selskii A.O., Hramov A.E., Koronovskii A.A., Moskalenko O.I., Balanov A.G. Bifurcation phenomena in a semiconductor superlattice subject to a tilted magnetic field. *Phys. Lett., A*, 2016, vol. 380, no. 1-2, pp. 98-105.
13. Makarov V.V., Maksimenko V.A., Koronovskiy A.A., Skvortsova Yu.M., Khramov A.E. Vysokochastotnyy impedans poluprovodnikovoy sverkhreshetki vo vneshney rezonansnoy sisteme. *Pis'ma v zhurnal tekhnicheskoy fiziki (Pis'ma v ZhTF) – Applied Physics Letters*, 2015, vol. 41, no. 24, pp. 44-50.
14. Balanov A.G., Zhuravlev M.O., Koronovskiy A.A., Sel'skiy A.O., Khanenko M.V., Khramov A.E., Shurygina S.A. K voprosu o modelirovani raspredeleeniya elektronov po impul'sam v poluprovodnikovoy sverkhreshetke. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya Estestvennye i tekhnicheskie nauki – Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences*, Tambov, 2010, vol. 15, no. 2, pp. 519-523.
15. Makarov V.V., Khramov A.E., Koronovskiy A.A., Moskalenko O.I., Maksimenko V.A., Alekseev K.N., Balanov A.G. Perekhod k khaosu i khaoticheskaya generatsiya v poluprovodnikovoy sverkhreshetke vo vneshney rezonansnoy sisteme. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya Fizicheskaya*, 2014, vol. 78, no. 12, pp. 1564-1567.
16. Maksimenko V.A., Makarov V.V., Koronovskii A.A., Alekseev K.N., Balanov A.G., Hramov A.E. The effect of collector doping on the high-frequency generation in strongly coupled semiconductor superlattice. *Europhysics Letters*, 2015, vol. 109, p. 47007.
17. Makarov V.V., Maksimenko V.A., Khramova M.V., Pavlov A.N., Hramov A.E. Dynamics and Fluctuations in Biomedical Photonics XIII. *Proc. SPIE*, 2016, vol. 9707, pp. 9707-9713.
18. Alekseev K.N., Balanov A.G., Koronovskiy A.A., Maksimenko V.A., Moskalenko O.I., Khramov A.E. Evolyutsiya vozmushcheniya opornogo sostoyaniya poluprovodnikovoy sverkhreshetki vblizi poroga generatsii. *Izvestiya vuzov. Prikladnaya nelineynaya dinamika*, 2012, vol. 20, no. 2, pp. 165-178.
19. Wacker A., Schwarz G., Prengel F. et al. Probing growth-related disorder by high-field transport in semiconductor superlattices. *Phys. Rev. B*, 1995, vol. 52, p. 13788.
20. Patra M., Schwarz G., Schöll E. Bifurcation analysis of stationary and oscillating field domains in semiconductor superlattices with doping fluctuations. *Phys. Rev.*, 1998, vol. 57, pp. 18-24.

GRATITUDE: The work is fulfilled under support of Russian Fund of Fundamental Research (project no. 16-32-60059).

Received 1 April 2016

Сельский Антон Олегович, Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского; Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А., г. Саратов, Российская Федерация, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, e-mail: feanorberserk@gmail.com
Selskiy Anton Olegovich, National Research Saratov State University; Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russian Federation, Candidate of Physics and Mathematics, Research Worker, e-mail: feanorberserk@gmail.com

Лопатин Дмитрий Валерьевич, Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, г. Тамбов, Российская Федерация, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры математического моделирования и информационных технологий, e-mail: +79107540080@ya.ru

Lopatin Dmitriy Valerevich, Tambov State University named after G.R. Derzhavin, Tambov, Russian Federation, Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Associate Professor of Mathematical Modeling and Information Technology Department, e-mail: +79107540080@ya.ru